

Stima automatica della vulnerabilità intrinseca di un acquifero. Applicazione del metodo SINTACS con strumenti software GIS

Luisa Vernacchia^(a), Enrico Guastaldi^(b), Altair Pirro^(a),
Simone Febo^(a), Francesco Petrolo^(c)

^(a) Centro di GeoTecnologie dell'Università di Siena, via Vetri Vecchi 34 - 52027 - San Giovanni Valdarno (AR), Tel: +39 055-9119400, E-mail: luisa.vernacchia@cgt-spinoff.it

^(b) GeoExplorer Impresa Sociale S.r.l., Via Strasburgo 7, Zona Industriale di Bomba - 52022 - Cavriglia (AR), E-mail: guastaldi@geoexplorer.cgtgroup.org

^(c) LEM S.r.l., Via Leo Valiani 55/59, - 52025 - Levane Bucine (AR)

Abstract

La tutela qualitativa delle acque sotterranee occupa da sempre un ruolo predominante nello scenario dei provvedimenti volti alla gestione del territorio. Il lavoro in esame si relaziona, quindi, alla salvaguardia delle risorse idriche sotterranee, in un'ottica di automazione delle procedure atte a tutelarle.

Tali procedure mirano, generalmente, a stimare la vulnerabilità intrinseca di un acquifero all'inquinamento e, ad oggi, vengono spesso supportate dall'utilizzo dei Geographic Information Systems.

L'obiettivo del presente lavoro è, però, quello di velocizzare le consuete procedure di stima, utilizzando il Model Builder di ESRI ArcGIS per creare un modello di calcolo, personalizzabile da ciascun utente ed aggiornabile rispetto a qualsiasi area di studio.

La metodologia scelta per la stima di vulnerabilità è il SINTACS, uno tra i più completi metodi noti in letteratura. Trattasi di un sistema parametrico a punteggi e pesi che permette di individuare su un dato territorio le aree a differente grado di vulnerabilità all'inquinamento tramite la stima di sette parametri fondamentali adattati a cinque diverse situazioni territoriali, che possono amplificare o meno l'influenza dei suddetti.

La procedura di automazione del SINTACS ha portato alla creazione di due processi: un modello principale (SINTACS Model), realizzato con il Model Builder di ESRI ArcGIS, e uno *script tool* accessorio (SINTACS Model-Scenari), realizzato in codice Python utilizzando la libreria ArcPy.

Il primo garantisce la produzione di tutti gli output previsti dal protocollo SINTACS, mentre il secondo individua gli scenari idrogeologici e di impatto sul territorio di indagine. Il collaudo dei modelli è stato effettuato su una piana alluvionale sita nel comune toscano di Laterina, in provincia di Arezzo.

Introduzione al SINTACS

Al fine di salvaguardare qualitativamente le acque sotterranee, risulta fondamentale circoscrivere su un dato territorio le aree maggiormente suscettibili di contaminazione, stimando quella che viene definita vulnerabilità intrinseca di un acquifero all'inquinamento, ovvero la facilità con cui un contaminante introdotto in superficie può raggiungere e diffondersi nelle acque profonde (Margat, 1968).

Tra le principali metodologie di valutazione (Civita, 1994), il metodo parametrico SINTACS R5 (Civita & De Maio, 2000) viene considerato come uno tra i più completi metodi noti in letteratura, nonché come uno dei più specifici da applicare sul territorio italiano.

Nel dettaglio, il SINTACS è un sistema parametrico a punteggi e pesi che permette di individuare su un dato territorio le aree a differente grado di vulnerabilità all'inquinamento tramite la stima di sette parametri fondamentali (Soggiacenza, Infiltrazione efficace, Non saturo, Tipologia di copertura, caratteristiche dell'Acquifero, Conducibilità idraulica, acclività della Superficie topografica) adattati a cinque diverse situazioni territoriali, detti scenari (Impatto Normale, Rilevante, Drenaggio, Carsismo, Fessurato) che possono amplificare o meno l'influenza dei suddetti. La procedura prevede che a ciascuno dei sette parametri venga attribuito un punteggio P_i compreso tra 1 e 10 utilizzando diagrammi SINTACS appositamente calibrati. Ogni punteggio assegnato dovrà essere, poi, moltiplicato per un dato coefficiente W_i , il quale assume valori compresi tra 1 e 5 e rappresenta il peso relativo assegnato a quel dato parametro. I pesi moltiplicatori hanno lo scopo di enfatizzare in maniera differenziata ciascuno dei sette parametri, a seconda dell'importanza che ognuno di essi riveste nell'ambito di una determinata situazione idrogeologica ed a seconda delle condizioni di impatto antropico e di utilizzo del territorio. Nel dettaglio, esistono cinque stringhe di pesi moltiplicatori, specifiche per ciascuno dei cinque scenari previsti dal metodo e individuabili nell'area di studio (Tab. 1).

	Stringa 1	Stringa 2	Stringa 3	Stringa 4	Stringa 5
Parametro	I. Normale	I. Rilevante	Drenaggi	Carsico	Fessurato
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	5	5	4

Tabella 1 - Scenari e stringhe di pesi moltiplicatori proposti dalle Linee Guida ANPA (Civita et al, 2001).

La stima deve essere riferita ad elementi areali denominati EFQ (Elementi Finiti Quadrati), perciò, prima di applicare la procedura, è necessario discretizzare il territorio di studio mediante una griglia a maglie regolari.

Una volta individuato lo scenario, e quindi la stringa, da relazionare a ciascuna EFQ, l'indice di vulnerabilità Intrinseca ($I_{SINTACS}$) si ottiene dalla sommatoria dei prodotti dei punteggi P_i assegnati a ciascun parametro moltiplicati per i rispettivi pesi W_i :

$$I_{SINTACS} = \sum_{i=1}^7 P_i W_i \quad [1]$$

L'indice SINTACS ottenuto può variare da 26 a 260; tale intervallo di valori viene suddiviso in sei classi con produzione della carta finale di vulnerabilità intrinseca dell'acquifero studiato.

Dalla consultazione della letteratura nazionale ed internazionale, innumerevoli sono le stime di vulnerabilità intrinseca che traggono supporto dalla tecnologia GIS (Rahman, 2008; Shekhar, 2015). Le procedure standard, tuttavia, risultano spesso laboriose, di conseguenza nasce l'idea di velocizzare tutto il processo di indagine attraverso la creazione di un modello di calcolo automatico, aggiornabile rispetto a qualsiasi area di studio e con punteggi settabili in base alle esigenze di ciascun utente. La procedura di stima da automatizzare è la citata metodologia SINTACS mentre lo strumento utilizzato è stato il Model Builder di ESRI ArcGIS.

Materiali e metodi

Operazione preliminare necessaria ai fini della corretta modellazione in ambiente Model Builder è stata la creazione di un *geodatabase* di lavoro, realizzato nel formato *file geodatabase* (.gdb) di ESRI. All'interno del suddetto *geodatabase* è stata generata una toolbox contenente due tool distinti per struttura e strumenti utilizzati:

- un modello principale denominato **SINTACS Model**, realizzato con il Model Builder del software ESRI ArcGIS in versione 10.3.1.;
- uno script tool accessorio, denominato **SINTACS Model – Scenari** e realizzato in codice Python utilizzando la libreria ArcPy.

Entrambi sono stati forniti di un apposito *Help* interattivo che guida l'utente nel loro utilizzo.

Il **SINTACS Model** permette di produrre tutti gli output previsti dal protocollo metodologico della *Release 5* del SINTACS (Civita & De Maio, 2000), nonché dalle linee-guida ANPA (2001). Direttamente da interfaccia (Fig. 1) l'utente può impostare il *workspace* di lavoro, nonché le dimensioni della cella elementare di indagine EFQ (*Cellsize*), fissando così la risoluzione della cartografia in uscita. In aggiunta, per ciascuno dei sette parametri SINTACS è riportata la tabella dei punteggi liberamente settabili dall'operatore. I dati di *input* necessari all'esecuzione del tool sono i seguenti: strato informativo poligonale rappresentante i limiti dell'area di indagine, Modello Digitale del Terreno (DTM), strato informativo puntuale con dati termo-pluviometrici, strato informativo poligonale dei complessi geologici, strato informativo puntuale con misure di soggiacenza o piezometria in relazione all'acquifero da investigare e lo strato informativo vettoriale degli scenari idrogeologici e di impatto individuati sull'area di interesse.

L'esecuzione del modello produce in automatico:

- Sette carte parametriche in formato raster, riclassificate con i punteggi SINTACS scelti dall'utente;
- Carta dei Pesì in formato raster, che mostra i diversi scenari idrogeologici e di impatto presenti nell'area di indagine;
- Carta dell'Indice SINTACS stimato per ogni cella elementare discretizzante l'area di studio e Carta di Vulnerabilità intrinseca finale.

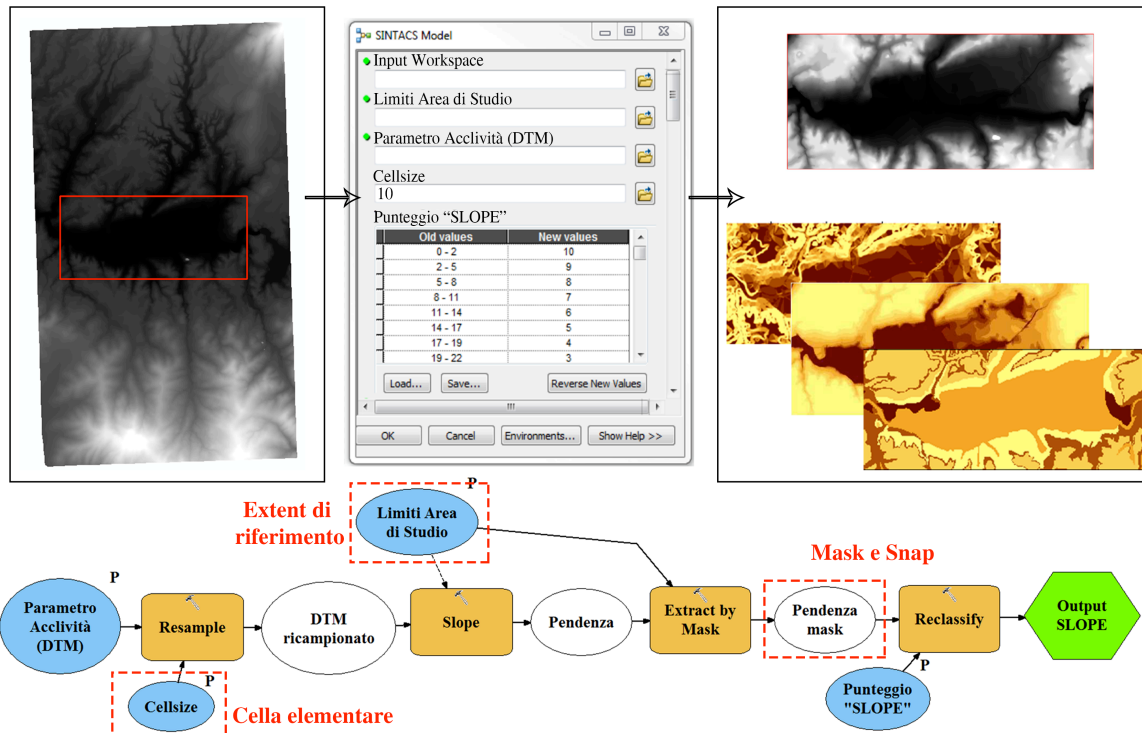


Figura 1 - Funzionamento del SINTACS Model destinato alla produzione della carta parametrica Acclività della superficie topografica - Interfaccia e architettura interna.

Le operazioni eseguite dal modello sono essenzialmente funzioni di *geo-processing* e di *Spatial Analyst* disponibili all'interno dello stesso software. La carta parametrica della Soggiacenza può essere ottenuta in due modalità, inserendo misure puntuali dirette della soggiacenza oppure misure piezometriche e un DTM. Per dare modo all'utente di utilizzare l'uno o l'altro procedimento, il modello è stato integrato con uno script in Python che applica la logica *if-then-else* e lega due rami di processo:

- il primo accoglie in input le misure di soggiacenza e ne interpola i valori tramite metodo IDW (Inverse Distance Weighting);
- il secondo interpola i valori puntuali di piezometria dopodiché, tramite Raster Calculator, calcola la differenza altimetrica tra un DTM e il raster della piezometria precedentemente ottenuto.

L'output prodotto verrà automaticamente riclassificato utilizzando una tabella di punteggi pre-impostati e liberamente modificabili per poi produrre la carta parametrica "S". La carta parametrica dell'Infiltrazione efficace "I" viene ottenuta inserendo i dati termo-pluviometrici delle stazioni più prossime all'area di studio: il tool crea un file raster per ciascun dato termo-pluviometrico mensile tramite il tool Polygon to Raster dopodiché viene avviato il calcolo automatico del bilancio idrogeologico applicando una serie di operazioni algebriche tra i raster di input (Map Algebra) e tenendo conto anche del coefficiente di infiltrazione potenziale (CIP). Per quanto riguarda i parametri Non saturo, Tipologia di copertura, Tipologia di Acquifero e Conducibilità idraulica, è stata modellata una architettura che permette all'utente di produrre automaticamente ben quattro carte dei Punteggi (N, T, A, C) utilizzando le informazioni disponibili sui complessi geologici come unico

parametro in input. La porzione di modello che crea la carta parametrica dell'acclività della superficie topografica "SLOPE" necessita come input di un DTM, di limiti dell'area di studio e delle dimensioni della cella di discretizzazione. Si caratterizza di tre tool fondamentali: *Resample*, *Slope* e *Extract by Mask*. Il *Resample* ricampiona il DTM in input, utilizzando il valore di *Cellsize* specificato dall'utente. Lo *Slope* produce il raster delle pendenze a partire da un modello di elevazione. L'*Extract by Mask* ritaglia perfettamente il DTM sui limiti dell'area di indagine e genera così un output impostato come maschera di ritaglio per tutti gli output in uscita dal modello generale (Fig. 1). Questi processi agiscono sulle variabili di ambiente (*environmental settings*), assicurando la perfetta co-registrazione di tutti i raster durante le successive elaborazioni. La carta dei Pesi in formato raster viene prodotta solo se in input viene data una *feature class* vettoriale con le situazioni idrogeologiche e di impatto individuate sul territorio di indagine. Tale strato informativo può essere elaborato personalmente oppure con l'ausilio dello *script tool* accessorio SINTACS Model – Scenari, per la cui descrizione si rimanda al sottoparagrafo successivo. Dopo aver importato il file vettoriale degli scenari il tool Polygon to Raster creerà la carta dei pesi. Lo strumento fondamentale che permette il calcolo automatico dell'Indice è il Raster Calculator, che esegue la stima per ciascuna cella elementare, applicando l'equazione [1]. Dopo aver ottenuto l'indice SINTACS, il modello riclassifica il raster nelle sei classi di vulnerabilità producendo in output la carta di Vulnerabilità intrinseca dell'area di indagine.

Il **SINTACS Model – Scenari** permette all'operatore di produrre in automatico la carta degli scenari idrogeologici e di impatto in formato vettoriale. L'output in questione può essere utilizzato come parametro di input all'interno di SINTACS Model per produrre la Carta dei Pesi. I dati *required* per l'esecuzione del tool sono uno strato informativo poligonale dei complessi geologici e uno strato informativo poligonale delimitante l'area di studio, mentre l'utente ha la possibilità di scegliere se utilizzare una Carta Tecnica Regionale (CTR) nelle componenti lineare e poligonale oppure una *Corine Land Cover* (CLC) insieme ad uno strato informativo lineare dei corpi idrici superficiali (Fig. 2). L'utilizzo del percorso "CTR" anziché del percorso "CLC" porterà l'utente ad avere una circoscrizione più dettagliata degli scenari previsti dal SINTACS. La scelta di eseguire il tool con una *Corine Land Cover* e un layer dei corpi idrici porterà sicuramente ad una definizione più generalizzata degli scenari, ma anche più fattibile qualora non si abbia a disposizione una CTR. Tale possibilità di scelta è stata resa possibile inserendo la funzione *Exists* di ArcPy, che controlla l'esistenza o meno di una data variabile, seguita da diversi cicli di *if-else*, che, in base al risultato restituito da *Exists*, permettono l'esecuzione di processi rispetto ad altri. I suddetti processi consistono, in primis, nell'estrazione delle informazioni necessarie per l'individuazione degli scenari SINTACS (*arcpy.Select_analysis*) e, successivamente, nella loro elaborazione spaziale (*arcpy.Buffer_analysis*, *arcpy.Merge_management*, *arcpy.Dissolve_management*, etc.).

In base alle caratteristiche proprie di ciascun scenario, per la cui descrizione dettagliata si rimanda alle Linee Guida ANPA del 2001, lo script è stato organizzato nel modo seguente:

- lo scenario carsico è individuato dallo strato dei complessi geologici, per estrazione delle formazioni permeabili per fratturazione e carsismo;
- lo scenario delle aree in rocce fessurate è desunto dallo strato dei complessi geologici per estrazione delle formazioni permeabili per fessurazione;
- lo scenario ad impatto rilevante e quello delle aree soggette a drenaggio sono individuati da CTR o da CLC per estrazione dei codici di interesse contenuti in layer specifici;
- lo scenario normale è ottenuto per ultimo, impostando la funzione *Erase* (*arcpy.Erase_analysis*) tra i limiti dell'area di studio e gli scenari individuati fino a quel momento. In questo modo, lo scenario normale rappresenterà tutte le aree ancora non classificate.

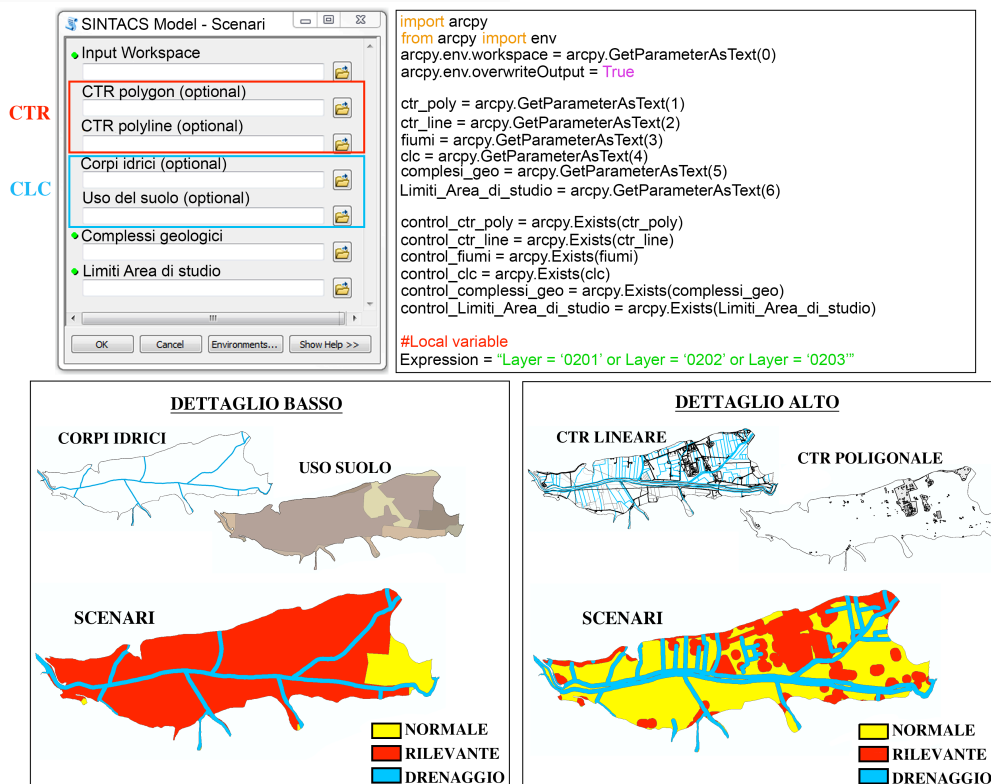


Figura 2 - Interfaccia, script e descrizione delle funzionalità del SINTACS Model – Scenari.

Al momento, si precisa che i codici di estrazione della CTR sono specifici per le Carte Tecniche Regionali della Toscana. In merito alle variabili d'ambiente, il parametro "Workspace" è stato definito come parametro di input, tramite la funzione *arcpy.GetParameterAsText()*: il *workspace* settato dall'utente diverrà cartella di lavoro da cui estrarre input e in cui immagazzinare output. Segue, poi, la funzione di sovrascrittura dei file già esistenti nello stesso *workspace* (*arcpy.env.overwriteOutput*), qualora sia necessario eseguire il tool più volte. Per garantire l'esecuzione del tool anche su altri dispositivi, il percorso scritto nel codice non è di tipo assoluto bensì rimanda ad un *workspace* temporaneo fornito da ArcGIS detto "in_memory". *In_memory* funge da *path* relativo e, nel contempo, immagazzina i file considerati temporanei evitando che vengano salvati nel *workspace* di lavoro. Al termine dell'esecuzione del tool, tutti i file presenti nella location "in_memory" saranno eliminati tramite la funzione

arcpy.Delete_management e l'unico output presente nel geodatabase di lavoro sarà un file vettoriale codificato in funzione degli scenari individuati, ovvero il layer degli scenari da inserire come input nel SINTACS Model.

Risultati

La funzionalità dei modelli è stata testata effettuando una stima di vulnerabilità all'inquinamento su un acquifero alluvionale sito nel comune di Laterina, in provincia di Arezzo. L'area di studio è stata definita delimitando non solo la piana alluvionale di Laterina, bensì un territorio che ingloba anche le condizioni al contorno della piana per testare al meglio l'intero modello di calcolo. E' stata così creata una *feature class* poligonale con estensione di circa 10 km².

In merito al passo del grigliato, si è scelto di creare delle EFQ di 10 metri di lato, dimensione che è parsa adeguata alla rappresentatività dei dati e coerente con il dettaglio delle informazioni disponibili. Per la creazione della carta della Soggiacenza parametrizzata il dato di ingresso è stata la *feature class* relativa ai pozzi ricadenti nell'area di Laterina, recante il valore di soggiacenza misurato in metri.

La carta dell'Infiltrazione efficace parametrizzata è stata prodotta utilizzando i dati su precipitazioni e temperature medie mensili, relativi al periodo 1992 - 2015 della stazione termo-pluviometrica di Arezzo. Lo strato dei complessi geologici, estratto dalla banca dati del Continuum geologico della Regione Toscana alla scala 1:10.000, una volta importato nel modello è stato processato al fine di produrre le quattro carte riclassificate dei parametri Non saturo, Tipologia di copertura, Caratteristiche dell'acquifero e Conducibilità idraulica. La carta parametrizzata dell'acclività della superficie topografica è stata prodotta importando un DTM con risoluzione pari a 10 metri. L'individuazione degli scenari idrogeologici e di impatto nell'area di Laterina è stata effettuata in automatico utilizzando lo script tool SINTACS Model - Scenari ed importando le componenti lineare e poligonale delle CTR della Regione Toscana n°288050 e n°288090; gli scenari individuati sono risultati essere: aree ad impatto Normale, Rilevante ed aree soggette a Drenaggio. La distribuzione areale dell'Indice SINTACS stimata dal modello di calcolo riporta valori numerici

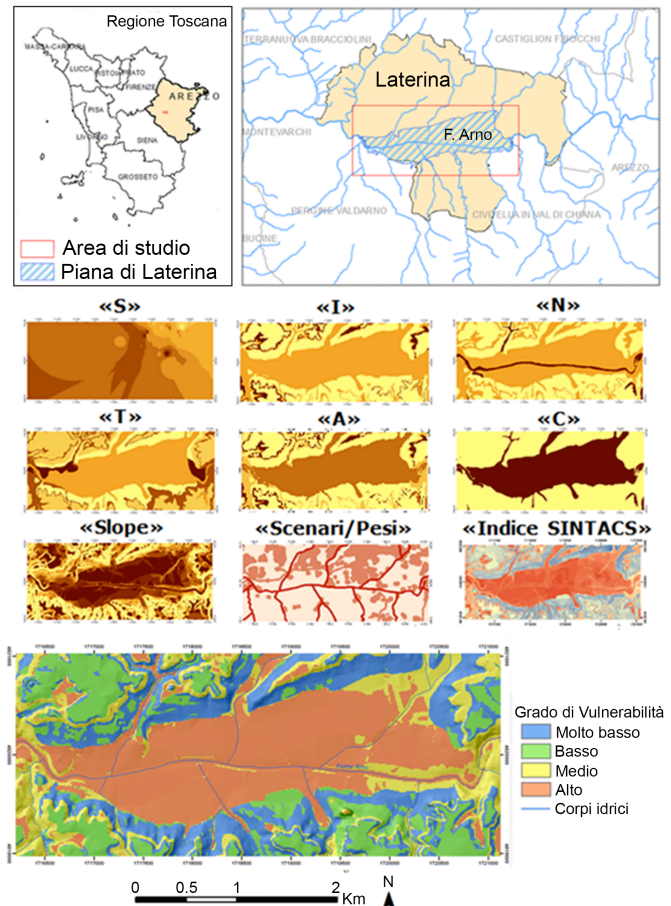


Figura 3 - Test-site e Carta della Vulnerabilità intrinseca della piana di Laterina prodotta in automatico dai tool di progetto.

compresi tra 41 e 164 e rispettano il range imposto dalla metodologia (26 – 260); la carta finale della vulnerabilità intrinseca prodotta per l’area di Laterina (Fig. 3) evidenzia, infine, quattro gradi di vulnerabilità intrinseca: bassissimo, basso, medio ed elevato.

Conclusioni

La fase di *testing* del SINTACS Model e dello script tool SINTACS Model - Scenari ha fatto emergere le seguenti considerazioni:

- gli output sul *test-site* di Laterina si considerano realistici e rappresentativi della potenziale vulnerabilità all’inquinamento dell’acquifero alluvionale in esame;
- il vantaggio più evidente è rappresentato dal numero ridotto di dati richiesti, per giunta facilmente reperibili; si ricorda, infatti, che le informazioni sulle formazioni geologiche, opportunamente codificate, possono produrre in automatico ben quattro dei sette parametri SINTACS (N, T, A, C);
- ulteriore beneficio si riscontra nella rapidità con cui è possibile cambiare di volta in volta i punteggi e valutare i relativi output finali. Questo rende flessibile il modello e lo adatta alle conoscenze specifiche di ciascun utente.

L’intero pacchetto è, inoltre, esportabile e condivisibile. Dall’analisi dei risultati ottenuti, si ritiene che entrambi i modelli abbiano elaborato i dati di input in maniera ottimale, comportando una incomparabile riduzione dei tempi di calcolo rispetto all’applicazione tradizionale del metodo SINTACS. Il SINTACS Model e il SINTACS Model – Scenari semplificano le operazioni di stima, velocizzano i tempi di produzione divenendo, così, un valido strumento di pianificazione territoriale. Attualmente esistono pochi tentativi di automazione del SINTACS con l’utilizzo del Model Builder di ArcGIS, si può, quindi, concludere che il presente lavoro rechi un apporto innovativo alla tutela delle acque sotterranee nel territorio italiano.

Bibliografia

ANPA (2001), *Linee Guida per la redazione e l’uso delle Carte della Vulnerabilità degli acquiferi all’inquinamento*, a cura di Civita M., De Maio M., Farina M., Zavatti A., Manuali e Linee Guida dell’ANPA 4/2001, Roma.

Civita M. (1994), *Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all’inquinamento: Teoria & Pratica*, Pitagora Editrice, Bologna.

Civita M., De Maio M. (2000), *SINTACS R5. Quaderni di tecniche di protezione ambientale*. Pitagora Editrice, Bologna.

Margat J. (1968), *Vulnérabilité des nappes d’eau souterraine à la pollution*, BRGM Publication 68 SGL 198 HYD. Orléans, Francia.

Rahman A. (2008), *A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India*. Applied Geography 28, 32–53.

Shekhar S., Pandey A.C., Tirkey A.S. (2015), *A GIS-based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in hard rock granitic aquifer*. Arab J Geosci, 8:1385–1401 DOI 10.1007/s12517-014-1285-2.